Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 3, Fall 2022, p. 301-317

Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamics

M. Dana[1], P. Ahmadi Moghaddam[2*]

1- MSc student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.67096.0

Received: 08-11-2020 Revised: 04-02-2021 Accepted: 06-02-2021 Available Online: 06-02-2021	**How to cite this article:** Dana, M., and P. Ahmadi Moghaddam. 2022. Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamic. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 301-317. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.2021.67096.0

Introduction

Today, the development of the livestock industry and feed supply is a vital issue due to the growing world population, the importance of animal protein supply, and the growing requirement for livestock products.

A porous medium refers to a solid-void (pore) space that is occupied by a fluid (gas or liquid). Generally, many of these pores are interconnected which makes the transportation of mass and heat possible through the pores and this contributes to a faster transportation process through the solid matrix. Porosity is the fraction of void space to total volume.

While the pores are large enough, water vapor and air in the porous media can be transported by molecular diffusion. Molecular diffusion of a gas species (e.g., vapor) in a gas mixture (e.g., vapor and air) is described by Fick’s law.

Materials and Methods

In this study, the samples were classified into four categories, including control, 3-impacts (low conditioning), 8-impacts (average conditioning), and 13-impacts (high conditioning). Each category included six samples (50-grams) that were used to measure different characteristics at different stages. All samples were weighed every two hours using a digital scale (0.001 gr precision). The leaf-stem separation force then was extracted using a texture analyzer. All experiments were repeated three times, and finally, the mean of these three repetitions was reported as the final value for the intended parameter.

The geometry of the alfalfa stem was drawn in Gambit software and after meshing and applying boundary conditions; it was transferred to ANSYS Fluent software. Then, while the solver was selected, adjusted under relaxation factors were applied. In the following, mesh independency was checked and the results were reported.

Results and Discussion

To ensure numerical accuracy, the experimental data should be validated with the simulation results. For this purpose, experimental moisture losses were compared to the software results and showed a good agreement. Then, the moisture ratio curves (kinetics of drying) and force-time chart were presented.

The impact of the moisture content of the tissue was evaluated on the value of force per time. Therefore, three samples of alfalfa with different relative humidity in terms of leaf-stem separation force were reported.

The results of the numerical simulations were presented as two main contours: the velocity magnitude and moisture (water vapor) mass fraction. The simulation results were provided for all different modes and compared to the experimental data. Finally, errors between both results were presented in a table.

Conclusion

Regarding the quality and losses of the final product and comparisons between four different modes (control, 3 impacts, 8 impacts, and 13 impacts), the mode with 8 impacts was selected as the best mode.

The Force-time chart illustrated two peaks due to the special multi-layer texture of the alfalfa. Regarding reducing the moisture ratio of the alfalfa as compared to the optimal, the force required to separate the leaves from the alfalfa stem was significantly decreased. Also, a significant increase in the losses was observed for impacts modes higher than 8.

Keywords: Alfalfa, Conditioning, Drying, Leaf separation force

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۱۷-۳۰۱

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن یونجه ساقه‌کوبی شده به روش دینامیک سیالات محاسباتی

مریم دانا[1]، پرویز احمدی مقدم[2]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

چکیده

در این پژوهش تأثیر شدت ساقه‌کوبی بر فرآیند خشک شدن یونجه و همچنین ماکزیمم نیروی مورد نیاز برای جدا کردن برگ از ساقه مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفت. متغیرهای مستقل، شدت ساقه‌کوبی در ۳ شدت (کم، متوسط و شدید)، زمان در ۷ سطح برای آزمایش اول و ۴ سطح برای آزمایش دوم و همچنین متغیرهای وابسته دو آزمایش به‌ترتیب نسبت رطوبت محصول و ماکزیمم مقدار نیروی مورد نیاز جدا کردن برگ از ساقه بودند. از دستگاه بافت‌سنج با سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بـرای انـدازه‌گیـری نیروی جدایش برگ از ساقه در رطوبت‌های مختلف استفاده گردید. همچنین برای شبیه‌سازی نرخ از دست‌دادن رطوبت ساقه از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در تخمین زمان خشک شدن یونجه، همبسـتگی بـالایی (اخـتلاف زیـر ۱۰٪) را با نتایج داده‌های تجربی نشان داد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که با کاهش رطوبت محصول و افـزایش شـدت سـاقه‌کـوبی، میـزان نیروی جدایش برگ از ساقه به‌طور معنی‌داری (۰/۹۹) کاهش یافت. در پایان نتایج، با در نظر گرفتن کیفیت محصـول نهـایی و تلفـات کـم‌تـر بـرگ و همچنین در نظر گرفتن زمان مناسب خشک شدن علوفه، ساقه‌کوبی با شدت متوسط (۸ ضربه) به‌عنوان بهترین حالت انتخاب گردید.

واژه‌های کلیدی: خشک شدن، عملیات ساقه‌کوبی، نیروی جدایش برگ، یونجه

مقدمه

یونجه بـا نـام علمـی *Medicago sativa* با توجه به وجود تنوع اقلیمی در مناطق مختلف آب و هـــوایی کشت می‌شود. یونجه با دارا بـودن عملکرد خـوب در واحد سطح و خوش‌خوراکی مطلوب به‌عنوان ماده اصـــــلی تأمین‌کننده پروتئین، مواد معدنی، ویتامین A و عوامل رشد، جایگاهـی ویژه در تغذیه دام و صنعت دامپروری دارد. با در نظـر گــرفتن روند رو به افزایش جمعیت جهـــان و اهمیت تأمین پروتئین حیوانی و نیاز روزافزون به فرآورده‌های دامی، توسعه صنعت دامپروری از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در این رابطه تأمین خوراک دام یـک مسئله حیاتی است (Aboltins and Kic, 2018). بعد از سال ۱۹۷۰، افزایش قابل ملاحظه‌ای در فرآوری یونجه بـرای تولیـد محصـولاتی مانند پلت‌ها و بسته‌بندی‌های مکعبی شکل به خـاطر راحتـی حمـل و نقل این محصول مشاهده شـده اسـت. یکی از مراحل مهم در زراعت یونجه، برداشت آن بوده و تلفات در این مرحله یکی از دغدغـه‌هـای عمده کشاورزان است (Wu, 2004).

تفاوت‌های هندســـی و ســـاختاری بین ساقه و برگ در گیاهـــان زراعـــی وجـــود دارد، (بـــرگ با نـــرخ بیش‌تری نسبت به ساقه خشک می‌شود). بنابراین، برای افزایش نـرخ خشک شدن ساقه و هـم‌زمـانی خشک شدن آن با برگ، می‌توان از روش‌های مختلف مکانیکی که با جابجا کردن، خراش، له کردن یا شکستن ساقه راهی برای خروج رطوبت فراهم می‌کنند، استفاده کرد. به‌واسـطه حساسـیت موجـود در مورد خشک شدن یکنواخت برگ و ساقه، بایستی حـدالامکان سـطح رطوبت برگ و ساقه مقدار نسبتاً یکسانی داشته باشند. دلیل این الـزام این است که در صورت صرف زمان برای رسـیدن رطوبـت سـاقه بـه مقدار مناسب بسته‌بندی (حدود ۱۲ الی ۱۴ درصد) بـه‌واسـطه خشـک شدن بیش از حد برگ، افـزایش شـدید ریـزش بـرگ رخ خواهـد داد (Siles *et al.*, 2015). برعکس، اگر ساقه رطوبت بالایی داشته باشد و رطوبت برگ برای بسته‌بندی ملاک قرار گیرد، بـه‌واسـطه رطوبـت بالای ساقه، احتمال فساد محصول بسته‌بندی شـده بـالا خواهـد بـود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشـگاه ارومیـه، ارومیـه، ایران
۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.67096.0

(Kung *et al.*, 1987). لذا بایستی ترتیبی اتخاذ گردد که سطوح رطوبتی ساقه و برگ نزدیک به یکدیگر باشند.

با پیشرفت علوم محاسباتی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی همچون خشک شدن گیاهان بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. دلیل این عمل، مزیت‌های مختلف شبیه‌سازی از جمله کاهش هزینه‌ها، کنترل دقیق فرآیند و همچنین زمان کمتر شبیه‌سازی نسبت به شرایط واقعی می‌باشد. طیف وسیعی از مواد غذایی و محصولات کشاورزی از جمله بافت‌های گیاهی، غلات ذخیره شده در انبارها و مواد غذایی بسته‌بندی شده در سردخانه را می‌توان به‌عنوان مواد متخلخل در نظر گرفت. یک ماده متخلخل[1] به یک ساختار نسبتاً جامد اطلاق می‌شود که دارای مجاری و منافذی بوده که با سیال (گاز یا مایع) پر می‌گردد. به‌طور کلی، بسیاری از این منافذ به‌صورت داخلی به یکدیگر متصل هستند؛ به‌طوری که انتقال جرم از طریق منافذ امکان‌پذیر است و در واقع فرآیند انتقال سریع‌تر از طریق ساختار جامد انجام می‌پذیرد. در سیستم‌های غذایی، بخش عظیمی از فرآیندها می‌توانند به‌عنوان انتقال جرم و گرما از طریق محیط متخلخل مشاهده شوند (Datta, 2007a; Datta, 2007b). انتشار مولکولی گونه‌های گازی (به‌عنوان مثال بخار) در یک مخلوط گازی (به‌عنوان مثال، بخار و هوا) توسط قانون فیک (رابطه ۱) توصیف می‌شود:

$$n_g^{diff} = -D_g \frac{\partial c_g}{\partial s} \qquad (۱)$$

که g نشان‌دهنده گونه‌های گاز، n_g^{diff} شار جرمی گاز با توجه به انتشار، D_g قابلیت انتشار مولکولی گاز در محیط متخلخل، c_g غلظت گاز و s مسافت است. قابلیت انتشار مولکولی گاز در حالت توده‌ای به قابلیت انتشار مولکولی گاز داخل ماده متخلخل با استفاده از انحنا[2] τ و تخلخل ϕ مربوط می‌گردد (رابطه ۲):

$$D_g = \frac{D}{\tau}\phi \qquad (۲)$$

که D قابلیت انتشار گاز در توده است. همچنین مخلوط بخار آب و هوا به‌عنوان گاز ایده‌آل فرض می‌گردد (Datta, 2007b).

از جمله اولین مطالعات انجام شده در مورد مدل خشک کردن یونجه در شرایط مزرعه‌ای می‌توان به کار انجام شده توسط روتز و چن (Rotz and Chen, 1985) اشاره کرد؛ در این مطالعه نرخ خشک شدن یونجه را بین نسبت رطوبت ۲۰ تا ۸۰ درصد (بر پایه تر) اندازه‌گیری کرده و از همبستگی خطی برای تعیین فاکتورهای محیطی نرخ خشک شدن استفاده کردند. در مطالعه‌ای دیگر پاتیل و همکاران (Patil *et al.*, 1993) یونجه تازه بریده شده (۶۵ تا ۸۰ درصد نسبت رطوبتی) را به دو صورت مکانیکی و شیمیایی تیمار داده و سپس در یک خشک‌کن خشک کردند. ساقه‌های خرد شده بین سطوح نرم و صاف و یا بین دو غلتک شیاردار طولی سه برابر سریع‌تر از ساقه‌های فشرده خشک شدند. از نظر سطوح رطوبتی، برگ ها دو برابر سریع‌تر از ساقه‌های خرد شده و چهار برابر سریع‌تر از ساقه‌های خرد نشده خشک شدند. مدل‌سازی گذر هوای سرد از روی پلت‌های یونجه توسط فاسینا و سخن‌سنج (Fasina and Sokhansanj, 1995) انجام شده است. در مدل آن‌ها از معادلات جرم و حرارت توزیع شده برای توصیف دما و رطوبت پلت‌ها استفاده شد. همچنین کوپل کردن[3] فرآیندهای انتقال جرم و حرارت انجام گردید. فرهنگ و همکاران (Farhang *et al.*, 2010) یک آون مایکروویو آزمایشگاهی را برای خشک کردن یونجه با اعمال توان مایکروویو در پنج سطح (۱۸۰، ۳۶۰، ۵۴۰، ۷۲۰ و ۹۰۰ وات) استفاده کردند. برازش[4] داده‌های تجربی با سه مدل لوئیس[5]، هندرسون- پابیس[6] و وانگ- سینگ[7] نشان‌دهنده این بود که منحنی‌های خشک شدن به‌وسیله مدل وانگ-سینگ، بهتر توصیف شدند. شبیه‌سازی سینماتیکی و مطالعه تجربی بر روی جریان هوای چرخشی برای خشک کردن یونجه توسط چه و همکاران (Che *et al.*, 2015) انجام گردید؛ محققان یک مدل آیرودینامیکی برای یونجه براساس نتایج تجربی چرخش یونجه در جریان هوا ایجاد کردند. در این مطالعه، تاثیر سرعت جریان هوای خشک، سرعت اولیه و زاویه جریان هوا بررسی گردید. سیلس و همکاران (Siles *et al.*, 2015) محتوای رطوبتی و دما را برای سینتیک خشک‌کردن یونجه به‌طور همزمان مدل‌سازی کردند. طبق نتایج به‌دست آمده، ۹۵٪ از نتایج تجربی مربوط به تغییر دما در داخل ساقه با زمان شبیه‌سازی شدند. یک مطالعه تجربی در مورد خشک کردن مایکروویو یونجه در دستگاه خشک‌کن مداوم[8] انجام شده است. حفظ کاروتن در این فرآیند مهم‌ترین هدف پژوهش بود. شدت پایین تخریب کاروتن در فرآیند خشک‌کردن مایکروویو با این واقعیت تفسیر می شود که استفاده از خلاء امکان خشک‌کردن در دمای پایین‌تر را فراهم می‌کند و باعث کاهش اکسیداسیون آن می‌شود (Ivanov *et al.*, 2018).

با پیشرفت کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در بخش‌های مرتبط کشاورزی با صنعت، پژوهش‌های متنوعی در این بخش انجام شده است. یک رویکرد مدل‌سازی عددی برای خشک کردن زیست‌توده ارائه شده بود. مدل CFD توسعه‌یافته با استفاده از مدل تحلیلی موجود که بر اساس تبخیر است، اعتبارسنجی شد. توافق

1- Porous medium
2- Tortuosity

3- Coupling
4- Fitting
5- Lewis
6- Henderson - Pabis
7- Wang- Singh
8- Continuous dryer

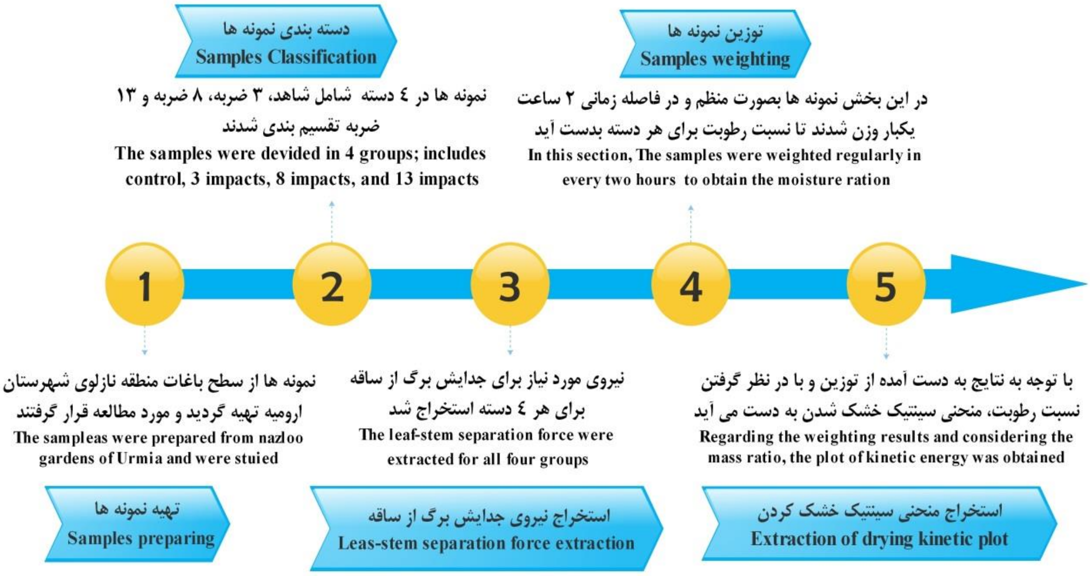
قابل‌قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده محتوای آب به‌دست آمد (Bartzanas *et al.*, 2012). در مطالعه‌ای با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر قطر ذرات مواد غذایی بر روی پارامترهای عملکردی سیکلون جداکننده شامل افت فشار و سرعت مورد مطالعه قرار گرفت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). صبرعلیلو و همکاران (Sabralilou *et al.*, 2019) مطالعه‌ای را بر روی پروانه‌ی ۶ پره موتور تراکتور ITM399 با استفاده از روش حجم محدود و مدل تعیین نویز جریان نویز پهن باند موجود در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام دادند. طبق نتایج، بیشینه مقدار نویز در نوک پره‌ها گزارش شد که به علت وجود سرعت و فشار دینامیکی بالا در این ناحیه بود. همچنین یک مطالعه عددی به بررسی جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا انجام شد. در مطالعه آن‌ها در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد (۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه) و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ متر بر ثانیه)، مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی و افت فشار به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفت (Naimi *et al.*, 2019). در مطالعه دیگری اثر تیغه انحرافی بر ویژگی‌های جریان در محفظه جداسازی نخود به‌صورت عددی و تجربی مطالعه گردید. در این پژوهش از مدل k-ε استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته و از حلگر بر مبنای فشار برای حلگر جریان بهره گرفته شد. همچنین نتیجه نشان داد که مدل آشفته مورد نظر از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در جداکننده‌های ثقلی برخوردار است (Zobeiri *et al.*, 2019). در بخش فرآوری چغندرقند در یک کارخانه تولید شکر، شبیه‌سازی ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در بخش کریستالیزاسیون مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه بخار مرده به‌وسیله یک ترموکمپرسور احیا شده و برای مصرف دوباره مورد مصرف قرار گرفت (Rezvanivandefanayi *et al.*, 2019).

با توجه به بررسی منابع و در نظر گرفتن حساسیت مواد پروتئینی موجود در یونجه به حرارت، تاکنون مطالعه جامعی در جهت بررسی شدت ساقه‌کوبی یونجه در شرایط بدون استفاده از خشک‌کن صنعتی انجام نشده است. همچنین، مطالعه عددی در قالب شبیه‌سازی فرآیند انتقال جرم به هنگام خشک شدن یونجه صورت نگرفته است. هدف از این تحقیق توسعه یک مدل عددی به‌منظور دستیابی به یک روش دقیق و سریع برای بررسی فرآیند خشک‌کردن یونجه و نیز بررسی کیفیت آن با استفاده از داده‌های تجربی می‌باشد. همچنین نمودار سینتیک خشک‌کردن در شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی استخراج شده است. سپس با ارزیابی نمودن زمان مناسب برای رسیدن به مقدار رطوبت بهینه جهت بسته‌بندی یونجه و بررسی تلفات در شدت‌های مختلف، بهترین حالت برای ساقه‌کوبی پیشنهاد گردیده است.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در دو بخش داده‌برداری تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام گرفته است. روندنمای داده‌برداری تجربی در این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است. در ابتدا، نمونه‌های یونجه از مزارع کشاورزی منطقه نازلوی شهرستان ارومیه در آذربایجان غربی تهیه گردیدند؛ سپس نمونه‌ها در ۴ تیمار مختلف شدت ساقه‌کوبی (شاهد، ساقه‌کوبی با شدت کم، متوسط و شدید) دسته‌بندی شدند و نیروی مورد نیاز برای جدایش برگ از ساقه در تیمارهای مختلف با دستگاه آنالیز بافت اندازه‌گیری شد. در مطالعات قبلی از دستگاه بافت‌سنج برای اندازه‌گیری کیفیت بافت میوه عناب تازه (Zhao *et al.*, 2018) و همچنین برای اندازه‌گیری نیروی برشی گوشت پخته شده استفاده شده است (Hopkins *et al.*, 2011). به‌منظور به دست‌آوردن نرخ از دست دادن رطوبت، نمونه‌ها وزن گردیدند و در نهایت منحنی سینتیک خشک کردن استخراج گردید. با توجه به حساسیت محتوای پروتئینی موجود در یونجه، خشک شدن نمونه‌ها به‌صورت طبیعی و بدون استفاده از حرارت انجام شد که برای شبیه‌سازی خشک شدن یونجه در شرایط مزرعه از این روش استفاده شده است.

شدت ساقه‌کوبی به‌صورت تعداد ضربات وارد به ساقه تعریف می‌گردد. در این تحقیق تأثیر شدت ساقه‌کوبی بر سینتیک خشک کردن یونجه و ماکزیمم نیروی مورد نیاز برای جدا کردن برگ از ساقه مورد مطالعه قرار گرفته است. از نظر آماری، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل با طرح بلوک‌های کامل تصادفی طراحی گردید. متغیرهای مستقل آزمایش‌ها، شامل شدت ساقه‌کوبی یونجه و زمان می‌باشد. شدت ساقه‌کوبی در سه شدت، ساقه‌کوبی با شدت کم (ساقه در ۳ محل ضربه خورده)، ساقه‌کوبی با شدت متوسط (ساقه در ۸ محل ضربه خورده) و ساقه‌کوبی شدید (ساقه در ۱۳ محل ضربه خورده) و زمان نیز در فواصل زمانی ۲ ساعته (۱۵ نمونه‌برداری ۲ ساعته) تا خشک‌شدن کامل یونجه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تعداد ضربه در شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی با توجه به محدوده سرعت پیشروی تراکتور در منابع (۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و با در نظر گرفتن سرعت غلتک‌ها، قطر آن‌ها و زوایای وارد شدن علوفه یونجه در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی اثر ساقه‌کوبی بر روی ساقه یونجه، از لاستیک‌های مشابه غلتک‌های ماشین ساقه‌کوبی برای ایجاد لهیدگی بر روی ساقه و به‌صورت دستی استفاده شد (شکل ۲). این شبیه‌ساز قابلیت تغییر غلتک‌های با تعداد تیغه مختلف را دارا می‌باشد. همچنین یک دیمر برای تغییر سرعت دورانی محور در نظر گرفته شده است.



شکل ۱– روندنمای انجام کارهای تجربی
Fig. 1. Diagrams of experimental works



شکل ۲– شبیه‌ساز ساقه‌کوب مورد استفاده
Fig.2. Used simulator for conditioning

هر تیمار شامل ۶ نمونهٔ ۵۰ گرمی بودند که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های محصول در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳-الف). متغیرهای وابسته آزمایش‌ها شامل رطوبت محصول و نیروی جدایش برگ از ساقه می‌باشند. به‌منظور به‌دست آوردن مقدار ماده خشک محصول، دو نمونه از محصول طبق استاندارد، در کوره تحت دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و مدت زمان ۲۴ ساعت طبق استاندارد ASAE S355.2 خشک شدند.

در ادامه، محصول خشک شده وزن گردید و مقدار ماده خشک آن طبق رابطه (۳) حاصل شد (Wiersma *et al.*, 1993):

$$D_p=W_w-W_d \qquad (۳)$$

که در آن D_p وزن ماده خشک، W_w وزن نمونه تر قبل از قرار دادن در کوره و W_d وزن نمونه خشک بعد از خارج کردن از کوره می‌باشد. تمامی نمونه‌ها به ازای هر دو ساعت با استفاده از ترازوی دیجیتال AND مدل DJ-V320A با دقت ۰/۰۰۱ گرم، وزن شده و سپس با به‌دست آمدن مقدار رطوبت محصول، برای استخراج ماکزیمم نیروی جدایش برگ از ساقه توسط دستگاه بافت‌سنج[1] مدل TA XT plus استفاده شد. برای داده‌برداری‌ها، از گیره‌های کششی متصل به پروب و از یک نیروسنج ۵ کیلوگرمی استفاده شد که در آن

1- Texture Analyzer

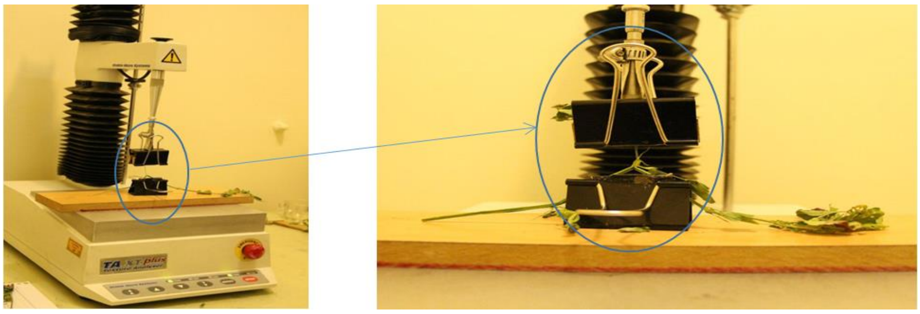
دقت اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱ ± گرم و ۰/۰۰۱± میلی‌متر می‌باشد (شکل ۴). سرعت پروب دستگاه بافت‌سنج بر روی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. در مطالعه‌ای، نویسندگان تاثیر محتوای رطوبتی و نرخ بارگذاری بر روی مقاومت کششی یونجه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، نرخ بارگذاری پروب کششی برای ساقه یونجه در سه سطح ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد (Nazari *et al.*, 2009). در مطالعه‌ای دیگر از یک دستگاه بافت‌سنج برای به‌دست آوردن مقاومت نهایی، چقرمگی و همچنین مدول یانگ پوست انگور سفید بی‌دانه استفاده کردند (Hassanpour *et al.*, 2011).



(الف) (a) — (ب) (b)

شکل ۳– (الف): دسته‌بندی‌های مختلف برای محصول یونجه، (ب) نمایی از یک ساقهٔ کوبیده شده

Fig.3. Alfalfa crop (a) various classifications, (b) a view of a conditioned stem



شکل ٤– دستگاه بافت‌سنج TA XT plus

Fig.4. TA XT plus texture Analyzer

برای به‌دست آوردن نسبت رطوبت از رابطه (۴) استفاده شد (Doymaz, 2007):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (۴)$$

که در آن، MR نسبت رطوبت، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (kg_{water}/kg_{ms})، M_e رطوبت تعادلی (kg_{water}/kg_{ms}) و M_0 محتوای رطوبت اولیه (kg_{water}/kg_{ms}) می‌باشد. لازم به ذکر است که m_s اندیس واحد محتوای رطوبت جرم ماده جامد می‌باشد. با توجه به این‌که مقدار M_e در مقایسه با مقادیر M_t و M_0 مقدار کوچکی است، لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و رابطه (۴) به‌صورت رابطه (۵) تغییر می‌کند (Doymaz, 2007):

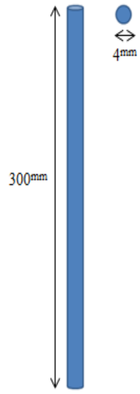
$$MR = \frac{M_t}{M_0} \qquad (۵)$$

نتایج استخراج شده در نرم‌افزار SPSS 23 Statistics 23 از نظر آماری مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. همچنین برای مطالعه معنی‌داری از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید.

شبیه‌سازی عددی

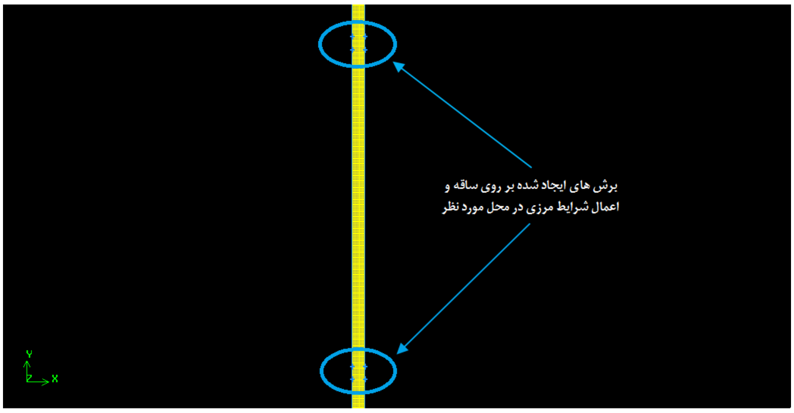
در پژوهش حاضر، هندسه ساقه یونجه در نرم‌افزار گمبیت ۲،۴،۶ رسم گردید و پس از شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی به نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۵ منتقل گردید. سپس نوع حلگر به‌صورت حلگر بر مبنای فشار انتخاب شد و پس از تنظیم موارد مربوط به حل از جمله تعیین باقی‌مانده و اعمال فاکتورهای زیرتخفیف[1]، شبکه از نظر استقلال شبکه بررسی شد و نتایج مربوطه استخراج گردید.

1- Under relaxation factors



شکل ۵– هندسه ساقه یونجه

Fig.5. Geometry of alfalfa stem



شکل ٦– شبکه‌بندی ساقه یونجه

Fig.6. Meshing of alfalfa stem

رسم هندسه کلی در نرم‌افزار گمبیت و شبکه‌بندی

برای رسم هندسه یونجه، چند نمونه تصادفی از ساقه‌های یونجه انتخاب و پس از اندازه‌گیری مؤلفه‌های مربوط به وجوه مختلف، میانگینی از ابعاد به‌عنوان اندازه مورد استفاده در مدل هندسی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این‌که می‌توان ساقه یونجه را با تقریب خوبی به‌صورت متقارن محوری[1] در نظر گرفت، برای کاهش زمان پردازش در انجام تحلیل‌ها از مدل دو بعدی استفاده گردید. شماتیکی از هندسه به همراه شبکه‌بندی آن در قالب شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

شبکه‌بندی

بعد از رسم هندسه، بایستی مدل هندسی شبکه‌بندی گردد تا تمامی معادلات برای شبکه‌ها حل گردیده و سپس جواب نهایی استخراج گردد. از این رو با توجه به نوع هندسه، انتخاب نوع شبکه مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به ویژگی‌های هندسی مسئله و قابلیت‌های شبکه‌های مختلف، از شبکه چهارضلعی[2] استفاده شد تا جواب مدل دقت بالایی داشته باشد. لازم به ذکر است که برای شبکه‌بندی مورد نظر، با توجه به ساختار با سازمان، مقادیر مربوط به کیفیت شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.

تعریف شرایط مرزی

بعد از رسم هندسه و شبکه‌بندی، ارائه شرایط مرزی برای مسئله ضروری بوده و تعریف نوع صحیح آن حائز اهمیت بالایی است. با توجه به شرایط مسئله از شرط مرزی ورودی[3]، شرط مرزی خروجی[4] و شرط مرزی دیواره[5] در حالت استاندارد استفاده شده است (جدول ۲).

جدول ۱– مقادیر مربوط به کیفیت شبکه

Table 1- Mesh quality parameters

پارامتر کیفیت Quality parameter	مقدار Value
Maximum aspect ratio	9.94
Minimum Orthogonal Quality	0.86
Maximum Orthogonal Skewness	0.21

برای مدل جریان، معادلات پیوستگی و مومنتوم در سه راستا برای سرعت‌های سطحی هوا و توزیع سرعت حل گردید. اساس حل و استخراج میدان در نرم‌افزارهای مختلف عددی، بر پایه معادلات بقا می‌باشد که معادله پیوستگی (قانون بقای جرم)، معادله مومنتوم و معادله انرژی به‌ترتیب به‌صورت رابطه‌های (۶) تا (۸) ارائه شده‌اند (Anderson, 2009):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) \qquad (۶)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[-p\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho g_i \qquad (۷)$$

1- Axisymmetric
2- Quad

3- Inlet boundary condition
4- Outlet boundary condition
5- Wall boundary condition

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها

Table 2- Applied boundary condition in simulations

توصیف شرط مرزی **Boundary condition description**	شرط مرزی مورد استفاده **Used boundary condition**
برای اعمال شرایط مرزی سرعت For applying velocity boundary condition	شرط مرزی ورودی Inlet boundary condition
شرط مرزی فشار خروجی در محل ضربات Pressure outlet boundary condition in impacts	شرط مرزی خروجی Outlet boundary condition
دیواره استاندارد برای اثرات دیواره Standard wall for wall effects	شرط مرزی دیواره Wall boundary condition

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E+u_i \mathrm{p})=\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i})+\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i\tau_{ij})$$

$$\tau_{ij}=\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \qquad (۸)$$

که در آن، ρ چگالی ($\mathrm{kg\ m^{-3}}$)، t زمان (s)، u_i و u_j به‌ترتیب اجزای سرعت سطحی ($\mathrm{m.s^{-1}}$)، P فشار (Pa)، g_i شتاب جاذبه ($\mathrm{m.s^{-2}}$)، μ ویسکوزیته (Pa.s) τ تانسور تنش (Pa)، E انرژی کل (J)، k انرژی جنبشی آشفته ($\mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$)، T دما (K) و $i, j = 1, 2, 3$ (x, y, z) هستند. از حگر بر پایه فشار استفاده شده و مسئله به‌صورت پایا حل شد. خواص مربوط به یونجه با در نظر گرفتن ساختار متخلخل آن از کتابخانه نرم‌افزار انسیس فلوئنت فراخوانی شد. ضرایب زیر تخفیف به‌جز برای چگالی، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شد. از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم پیشرو بهره برده شد. همچنین کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از اسکیم SIMPLE[1] انجام پذیرفت.

آزمون استقلال از شبکه

برای این‌که حل شبکه محاسباتی از تعداد شبکه مستقل باشد، آزمونی تحت عنوان آزمون استقلال از شبکه انجام گرفت. در این پژوهش از ۵ سطح شبکه شامل ۸۶۱۰ (سطح یک)، ۱۴۲۷۴ (سطح دو)، ۲۱۰۱۰ (سطح سه)، ۲۸۴۱۴ (سطح چهار) و ۳۶۲۴۶ (سطح پنج) عدد شبکه برای سطوح شبکه‌بندی‌ها بهره برده شد. مشخص شد که بعد از شبکه سطح سوم عدد شبکه (۲۱۰۱۰) تغییر محسوسی در جواب ایجاد نمی‌شود (شکل ۷). بنابراین از این سطح شبکه برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

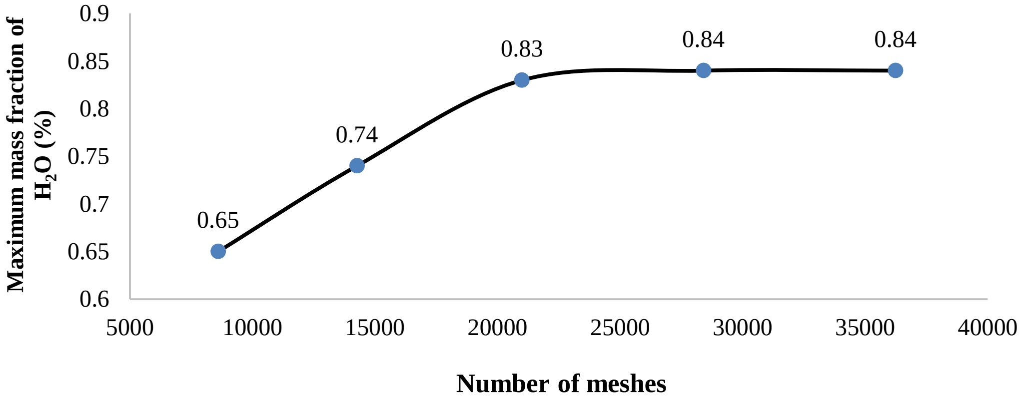
در این بخش نمودار سینتیک خشک شدن نمونه‌های مختلف ارائه شده است (شکل ۸). با مقایسه این نمودارها می‌توان دریافت که بافت گیاه در مواجه با شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی چه پاسخی را از خود نشان می‌دهد. در این نمودار نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن در ۴ تیمار مختلف شاهد، ۳ ضربه، ۸ ضربه و ۱۳ ضربه ارائه شده است. شکل ۸ نمودار تغییرات نسبت رطوبت را پس از گذشت ۳۰ ساعت و رسیدن رطوبت نمونه‌ها به حدود ۱۰ درصد نشان می‌دهد. در ابتدای فرآیند خشک شدن اختلاف بین تیمارهای مختلف کم است، ولی بعد از گذشت حدود ۵ ساعت از ابتدای شروع این فرآیند، اختلاف بین تیمارهای مختلف و علی‌الخصوص بین تیمار شاهد و تیمار ۱۳ ضربه با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

همانطور که انتظار می‌رود یونجه با ساقه‌کوبی شدید، سطح رطوبتی پایین‌تری نسبت به سایر تیمارها دارد. با توجه به شکل ۸، برای رسیدن یونجه به رطوبت حدود ۱۵ درصد در ساقه کوبی‌های با شدت کم، متوسط و شدید، به‌ترتیب حدود ۱۴/۵، ۱۳ و ۱۲ ساعت زمان نیاز است که این مقدار برای نمونه شاهد در حدود ۱۸ ساعت است، لذا ساقه‌کوبی بسته به شدت آن (کم، متوسط و شدید) می‌تواند زمان رسیدن به رطوبت ایده‌آل جهت بسته‌بندی را به‌ترتیب ۱۹/۴، ۲۷/۷ و ۳۳/۳ درصد برای شدت کم، متوسط و شدید کاهش دهد.

در نتایج تحقیقات روتز و چن (Rotz and Chen, 1985) به‌دست آمده است که کوبش‌های ایجاد شده بر روی ساقه گیاه یونجه در حین ساقه‌کوبی، نرخ استفاده از محلول‌های شیمیایی و همچنین محتوای رطوبتی اثر مستقیمی بر زمان خشک شدن یونجه دارد.

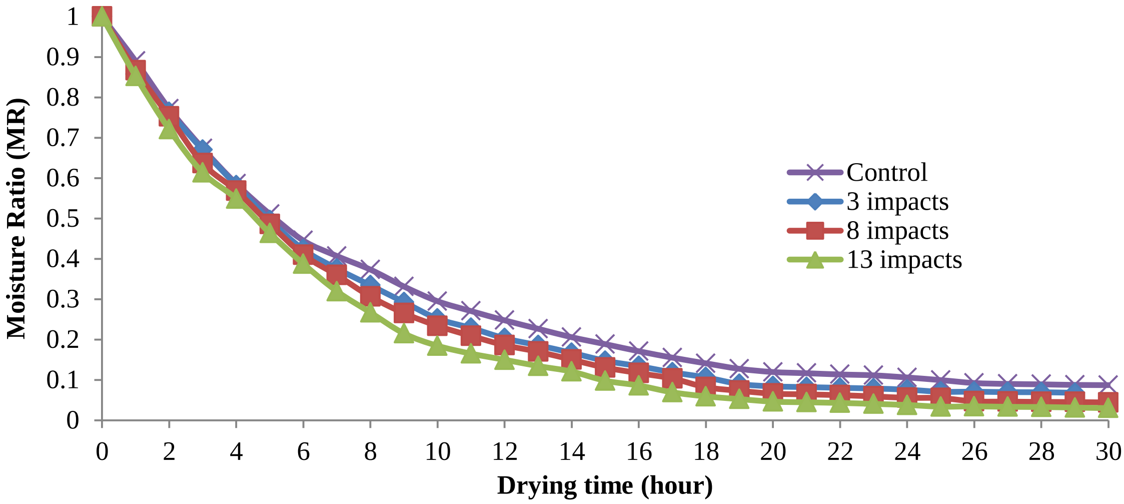
در جدول ۳ و ۴ نتایج مربوط به تجزیه واریانس منابع تغییر به‌ترتیب در آزمایش‌های اول و دوم ارائه شده است. در آزمایش اول شدت ساقه‌کوبی در ۳ سطح، زمان در ۷ سطح به‌عنوان متغیرهای مستقل و نسبت رطوبت گیاه یونجه بعد از خروج رطوبت از آن به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که آزمایش در ۳ تکرار انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که هر دو تیمار شدت ساقه‌کوبی و زمان اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹٪ بر روی زمان خشک شدن یونجه دارد.

1- Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation



شکل ۷- آزمون استقلال از شبکه

Fig. 7. Mesh independency test



شکل ۸- سینتیک خشک شدن تیمارهای مختلف یونجه

Fig. 8. Drying kinetics of various treatments of alfalfa

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شدت ساقه‌کوبی و زمان بر روی نسبت رطوبت

Table 3- Results of variance analyses (mean square) of Conditioning intensity and time on the moisture ratio

منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	مقدار F F-Value	احتمال Probability
شدت ساقه‌کوبی Conditioning intensity	2	85.597	3326.344**	<0.0001
زمان Time	6	8248.189	320529.436**	<0.0001
شدت ساقه‌کوبی×زمان Conditioning intensity× Time	12	2.695	104.735**	<0.0001
خطا Error	40	0.026		
کل Total	62			

**اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

**Significant difference in 1% probability level

همچنین در آزمایش دوم، شـدت سـاقه‌کـوبی و زمـان بـه‌عنـوان متغیرهای مستقل و بیشینه نیروی جـدایش بـرگ از سـاقه بـه‌عنـوان متغیر وابسته در نظر گرفته شـد. طبـق نتـایج بـه‌دسـت آمـده شـدت ساقه‌کوبی و زمان بر روی بیشینه نیروی جدایش برگ از ساقه نیـز در سطح آماری یک درصد، معنی‌دار به‌دست آمده است.

جدول ٤– نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شدت ساقه‌کوبی، زمان بر روی نیروی جدایش برگ از ساقه

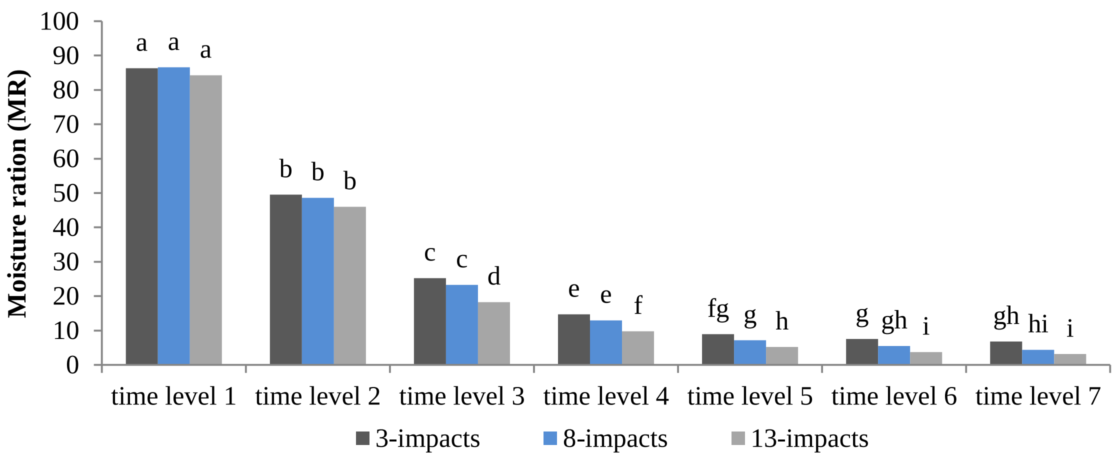
Table 4- Results of variance analyses (mean square) of Conditioning intensity, and time on the leaf-stem separation force

منبع تغییرات **Source of variations**	درجه آزادی **Degree of freedom**	میانگین مربعات **Mean square**	مقدار F **F-Value**	احتمال **Probability**
شدت ساقه‌کوبی Conditioning intensity	2	0.589	702.659**	<0.0001
زمان Time	3	0.530	631.884**	<0.0001
شدت ساقه‌کوبی×زمان Conditioning intensity× Time	6	0.021	25.099**	<0.0001
خطا Error	22	0.001		
کل Total	35			

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

**Significant difference in 1% probability level

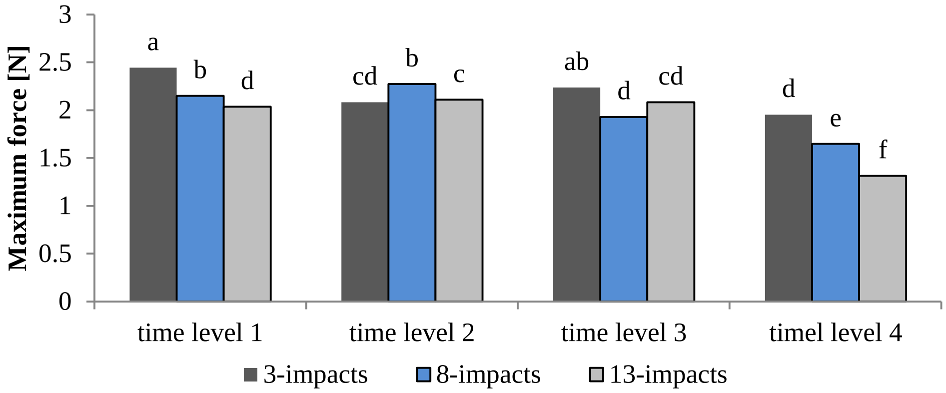
برای آزمایش اول، از شکل ۹ که در مورد مقایسه میانگین آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای نسبت رطوبت است می‌توان نتیجـه گرفـت که سطح دوم ساقه‌کوبی و سطح اول زمان، بیشترین تأثیر را بر فرآیند خشک کردن داشته است و هر سه تیمار سطح اول زمان در یک گروه قرار دارند. دلیل قرار گرفتن این سه تیمار فوق در یک گروه به خـاطر نرخ بالای انتقال رطوبت در ابتدای آزمـایش و انتقـال آب آزاد داخـل بافت ساقه می‌باشد. همچنین سطح سوم سـاقه‌کـوبی و سـطح هفـتم زمان دارای کم‌ترین تأثیر بر روی فرآیند خشک کردن می‌باشـد؛ چـرا که بافت ساقه مقدار محتوای رطوبتی زیادی را قبـل از ایـن تیمـار از دست داده و تغییرات رطوبت به سبب این تیمار دارای کم‌ترین مقـدار خود است.



شکل ۹– نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن برای آزمایش اول (نسبت رطوبتی)

Fig. 9. Results of Duncan test to compare means for first experiment (moisture ratio)

در آزمایش دوم شدت ساقه‌کوبی در ۳ سطح و زمان در ۴ سطح در نظر گرفته شده‌اند. در مورد شکل ۱۰ نیز می‌توان این‌گونه بیان کرد که در ابتدا با توجه به ساختار ساقه (دارای محتوای رطوبتی بالا) و همچنین زمان کوتاه‌تر در تیمار سطح ساقه‌کوبی اول و محدوده زمانی اول برای از دست دادن رطوبت، نیروی جدایش بالایی مورد نیاز بوده است. برعکس، تیمار دارای سطح سوم ساقه‌کوبی و محدوده زمانی چهارم، با اعمال شدت ساقه‌کوبی بالاتر و همچنین گذر زمان، بافت گیاه یونجه خشک شده و باعث کاهش بیشینه نیروی مورد نیاز برای جدایش برگ از ساقه می‌شود. دلیل اصلی کاهش نیروی ماکزیمم جدایش برگ از ساقه، کاهش رطوبت محصول است که تحت تاثیر شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی می‌باشد. در مطالعه نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2008)، تاثیر سطوح مختلف رطوبت (۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ درصد محتوای رطوبتی در مبنای تر) بر روی توان برشی و انرژی برش در سطح احتمال ۵ درصد مانند مطالعه حاضر به‌صورت معنی‌دار به‌دست آمد.



شکل ۱۰– نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای آزمایش دوم (نیروی جدایش برگ از ساقه)

Fig.10. Results of Duncan test to compare means for second experiment (leaf-stem separation force)

تأثیر رطوبت محصول بر نیروی جدایش برگ از ساقه

از جمله عوامل مهم موثر بر نیروی جدایش برگ از ساقه، محتوای رطوبتی بافت در زمان آزمایش است که باید از نظر تأثیر بر مقدار نیرو در زمان بررسی شود. از این رو سه نمونه از محصول ساقه‌کوبی شده یونجه با شدت‌های مختلف که نسبت‌های رطوبت‌های مختلف داشتند از نظر نیروی جدایش برگ از ساقه با همدیگر مقایسه شده و نتایج حاصل گزارش گردید (جدول ۵). با کاهش مقدار رطوبت، میزان نیروی مورد نیاز با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش میزان رطوبت و تردتر شدن محصول اتفاق می‌افتد. در کارهای مشابه ویژگی‌های خمشی و برشی ساقه گل رنگ در رطوبت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست آمده کاهش رطوبت ساقه سبب کاهش تنش برشی اعمال شده و همچنین نیروی برشی شده است (Shahbazi and Nazari, 2012). همچنین در مطالعه مربوط به تأثیر محتوای رطوبتی بر ویژگی‌های برشی کاه جو، محققان به این نتیجه رسیده‌اند که با کاهش رطوبت، تنش برشی و انرژی برش کاهش می‌یابد (Tavakoli *et al.*, 2009).

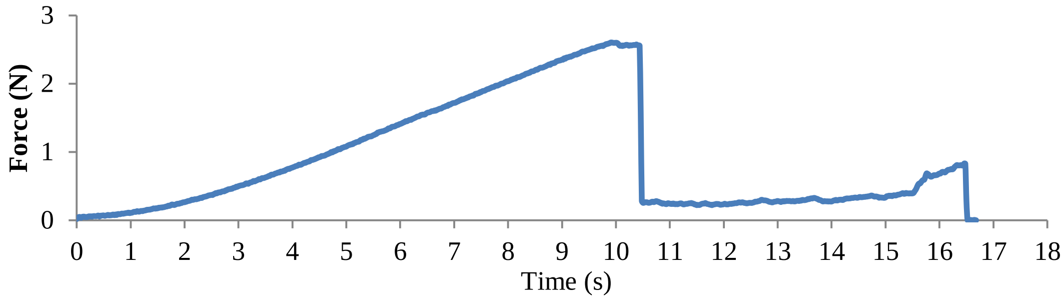
جدول ۵– مقدار ماکزیمم نیروی جدایش برگ ۶ ساعت بعد از شروع آزمایش در درصدهای مختلف رطوبت و شدت‌های ساقه‌کوبی

Table 5- Maximum leaf separation force for different moisture percent in 6 hours after starting the experiments at various conditioning intensities

شدت ساقه‌کوبی **Conditioning intensity**	درصد رطوبت **Moisture Percent (%)**	مقدار ماکزیمم نیرو **Maximum Force (N)**
شاهد (Control)	51.05	2.19
۳ ضربه (3 impacts)	49.56	2.15
۸ ضربه (8 impacts)	48.62	2.12
۱۳ ضربه (13 impacts)	46.33	2.07

نظر به اهمیت نیروی ماکزیمم برای جدایش برگ از ساقه، مقدار تغییرات این پارامتر برای تیمار ۳ ضربه به تصویر کشیده شد. همانطوری که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، با شروع فرآیند کشش در دستگاه بافت‌سنج، مقدار نیروی کششی در ده ثانیه اول افزایشی تقریبا خطی داشته و سپس با یک افت ناگهانی در یک مقدار پایین ثابت قرار گرفته و در نهایت به مقدار صفر (جدا شدن کامل برگ از ساقه‌گاه یونجه) رسیده است. دلیل این تغییرات نیرو به ازای زمان، به بافت بخش اتصال‌یافته برگ به ساقه مربوط می‌گردد که نشان‌دهنده ساختار چندلایه (بیشینه مقدار قله اول مربوط به لایه بیرونی و مقدار بیشینه قله دوم مربوط به لایه داخلی) بخش اتصال می‌باشد. چرا که لایه‌های بیرونی و درونی با توجه به همین ساختار چندلایه سطوح رطوبتی مختلفی دارند و همین تفاوت در سطح رطوبت سبب تغییرات ایجاد شده در نمودار نیرو–زمان می‌گردد (Engels and Jung, 1998).

نظری و همکاران (Nazari, *et al.*, 2008) مطالعه‌ای در قالب تاثیر محتوای رطوبتی (چهار سطح) و ارتفاع ساقه (سه سطح) بر روی تعدادی از ویژگی‌های مهندسی ساقه گیاه یونجه انجام دادند. طبق نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، توان برشی با افزایش محتوای رطوبتی، افزایش یافت، که در توافق با نتایج این مطالعه است. همچنین انرژی برش نیز با افزایش محتوای رطوبتی یک روند افزایشی را نشان داد. لازم به ذکر است، بیشترین توان برشی متعلق به بخش پایینی ساقه و کمترین توان برشی به بخش بالایی ساقه تعلق داشت.



شکل ۱۱– نمودار نیرو– زمان برای سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در تیمار سه ضربه

Fig. 11. Force-time chart in probe speed of 10 mm min^{-1} for 3 impacts treatment

شبیه‌سازی

برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی، بایستی نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از نتایج تجربی اعتبارسنجی گردد. برای این منظور از مقدار رطوبت که به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده بود و مقایسه آن با مقدار رطوبت خروجی از نرم‌افزار استفاده گردید و نتایج مربوطه در قالب شکل ۱۲ ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی از تطابق بالایی با نتایج تجربی (ماکزیمم خطای ۸/۸٪) برخوردار است. دلایل این تطابق خوب را می‌توان توانمندی بالای روش دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی فرآیند انتقال جرم دانست که در تحقیقات قبلی نیز به آن اشاره شده است (Erriguible *et al.*, 2006; Jamaleddine *et al.*, 2010). همچنین انتخاب تعداد مناسب مش برای شبکه‌بندی هندسه و انتخاب مدل مناسب جهت تحلیل عددی دانست. چرا که اگر تعداد مناسب شبکه‌بندی (چه تعداد بسیار بالا و چه تعداد پایین) اتخاذ نگردد، سبب افزایش خطای گرد کردن[1] و همچنین خطای قطع[2] خواهد شد که در هر دو مورد خطای عددی را افزایش خواهد داد.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی در قالب کانتورهای اندازه سرعت و کانتورهای نسبت جرمی مربوط به رطوبت (بخار آب) در ادامه ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل حجم بالای نتایج مربوط به حالت‌های مختلف، نتایج شبیه‌سازی مربوط به تیمار شاهد و سایر تیمارها برای حالت با سه ضربه ارائه شده است.

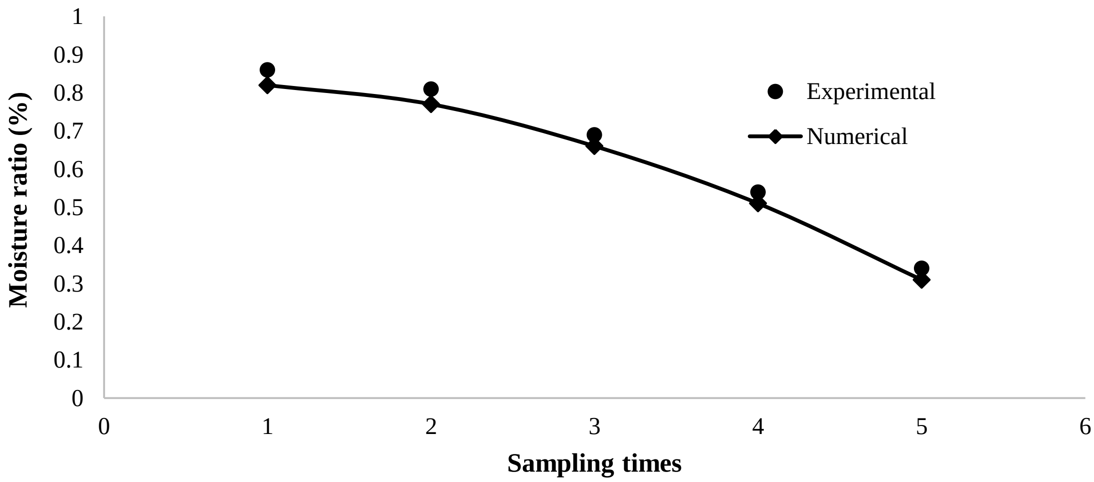
اندازه سرعت

اندازه سرعت برای مجرای داخلی ساقه بیانگر نرخ انتقال رطوبت در داخل ساقه است. با توجه به ماهیت حل مسئله که به‌صورت گذرا است، کانتور اندازه سرعت برای بخش‌های بالایی و پایینی ساقه یونجه ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۳ مشخص است، برای هر دو بخش در نزدیکی بخش‌هایی که ضربه به آن بخش‌ها وارد شده است، گرادیان سرعت مشهود است که این گرادیان به خاطر تغییرات مسیر و تغییرات سرعت محوری در آن نقاط ایجاد شده است

1- Round-off error

2- Truncation error

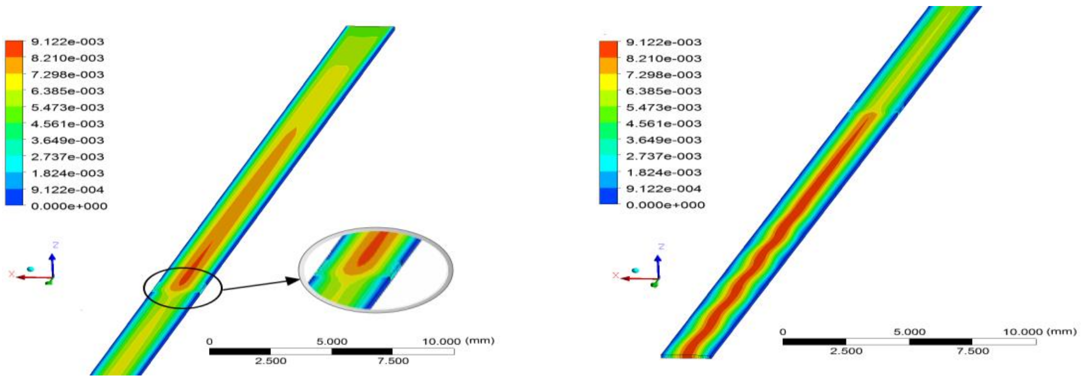
و سبب ایجاد تغییر در کانتور اندازه سرعت شده است. در شکل ۱۳– الف که به کانتور اندازه سرعت قسمت بالایی ساقه گیاه یونجه تعلق دارد، عمده مقدار سرعت در بخش مرکزی ساقه و در ادامه کاهش مقدار اندازه سرعت تا نزدیکی صفر در نزدیک دیواره، به‌خوبی نشان داده شده است که موید شرط عدم لغزش در نزدیک دیواره لحاظ شده است. همچنین با توجه به شکل ۱۳–ب می‌توان دریافت که برش‌های ایجاد شده با هدایت رطوبت از محل‌های بریده شده سبب کاهش اندازه سرعت بعد از محل اعمال برش شده و تقریباً سبب کاهش ۳۰ درصدی در مقدار اندازه سرعت راستای حرکت رطوبت گردیده‌اند.



شکل ۱۲– اعتبارسنجی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی

Fig. 12. Validation between experimental data and simulation results

نکته مهم دیگری که از کانتورها استخراج می‌گردد؛ کاهش میزان سرعت در مقطع ساقه به‌واسطه مقاومت داخلی ساختار متخلخل گیاه است که رفته رفته باعث کاهش سرعت انتقال مواد می‌گردد. مقدار بیشینه سرعت برای بخش داخلی ساقه مقدار $۹/۱۲۲\times۱۰^{-۳}$ $mm.s^{-1}$ است که به نوعی مقدار پایین اندازه سرعت و به تبع آن انتقال جرم در داخل ساقه را نشان می‌دهد. ضمناً با استفاده از کانتورها این نتیجه قابل برداشت است که در محل‌های اعمال ضربه، سرعت انتقال رطوبت از حدود میانگین ۰/۰۰۰۵ $mm.s^{-1}$ به حدود میانگین ۰/۰۰۲ $mm.s^{-1}$ رسیده است و افزایش حدوداً ۴ برابری را در این مناطق نشان می‌دهد که علت خشک شدن سریع‌تر یونجه ساقه‌کوبی شده، همین مسئله است.



(الف) **(ب)**

(a) **(b)**

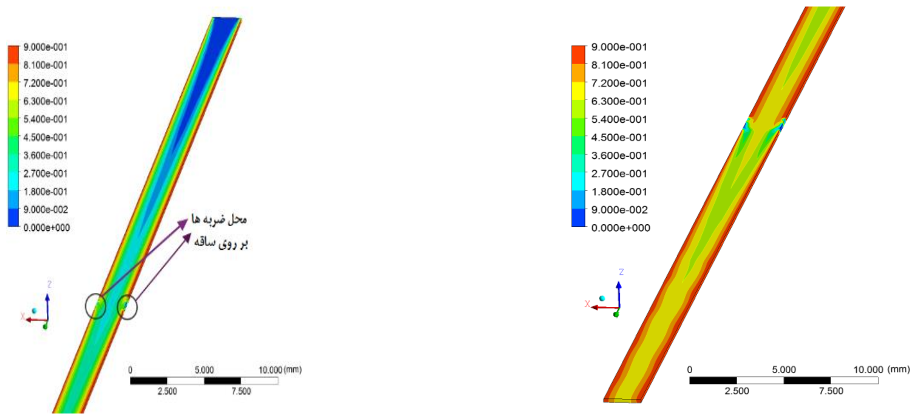
شکل ۱۳– کانتور اندازه سرعت؛ (الف): قسمت بالایی ساقه، (ب) قسمت پایینی ساقه

Fig. 13. Contour of velocity magnitude; (a): Top section of stem, (b): Bottom section of stem

نسبت جرمی رطوبت

با توجه به اهمیت انتقال جرم در فرآیند انتقال رطوبت، کانتورهای مربوط به نسبت جرمی رطوبت آورده شده است. در شکل ۱۴-الف که به بخش بالایی گیاه اختصاص دارد با توجه به محل انباشتگی رطوبت که نزدیک به دیواره می‌باشد، نسبت رطوبت در این نواحی بالاست، در بخش بالایی و با توجه به مسدود در نظر گرفتن بخش انتهای ساقه میزان انتقال رطوبت از این بخش دارای مقدار بسیار پایینی می‌باشد و در نزدیک دیواره به میزان صفر می‌رسد. همچنین در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه با توجه به عدم انباشتگی رطوبت، دارای نسبت جرمی نسبتاً پایینی می‌باشد.

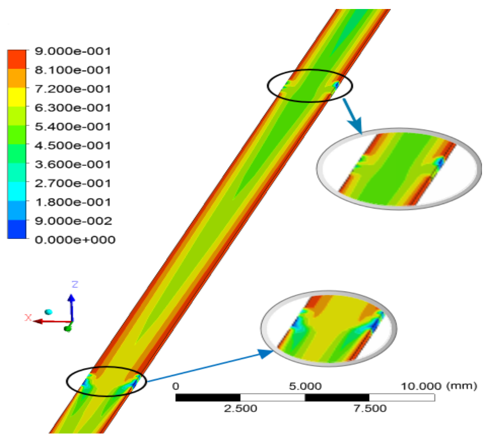
علاوه بر موارد ذکر شده، در شکل ۱۵ محل اعمال دو ضربه در کنار هم ارائه شده است تا روند کاهشی میزان رطوبت در محصول و خشک شدن آن با گذشت زمان و تحت تأثیر انتقال رطوبت از دیواره‌ها و همچنین محل‌های اعمال ضربه قابل‌توجیه باشد. همچنین میزان گرادیان نسبت جرمی در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه به‌خوبی قابل مشاهده است. این نکته حائز اهمیت است که بیشترین میزان نسبت جرمی رطوبت در نزدیکی دیواره‌ها و به مقدار تقریبی ۰/۸۶ می‌باشد. از نظر نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی سایر حالت‌ها نیز تطابق خوبی بین نتایج به‌دست آمده از نتایج تجربی و شبیه-سازی‌های عددی برقرار است و در تمامی سطوح خطا زیر ۱۰ درصد می‌باشد. در جدول ۶ مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به همراه مقدار خطا بر حسب درصد ارائه شده است.



(الف) (a) — (ب) (b)

شکل ۱۴- کانتور نسبت جرمی رطوبت؛ (الف): قسمت بالایی ساقه، (ب) قسمت پایینی ساقه

Fig. 14. Mass fraction contour of humidity; (a): Top section of stem, (b): Bottom section of stem



شکل ۱۵- کانتور نسبت جرمی رطوبت

Fig. 15. Mass fraction contour of humidity

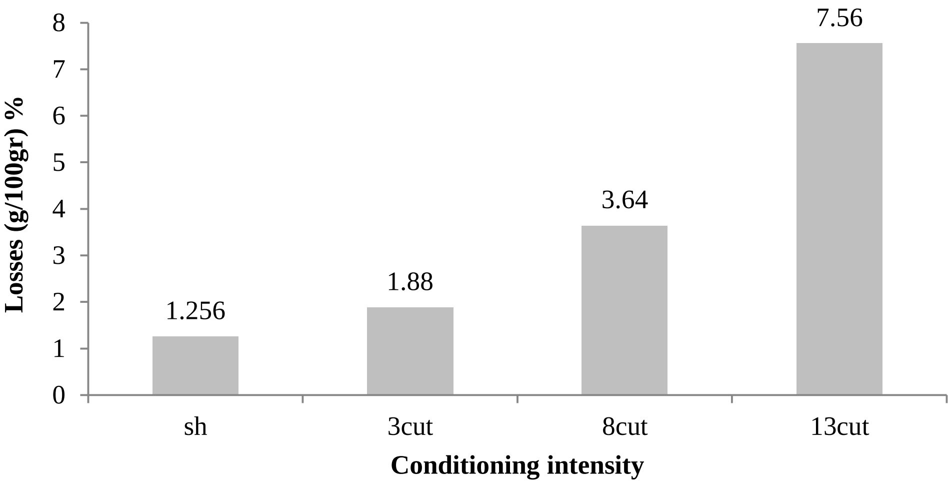
جدول ٦– مقایسه بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی نسبت جرمی رطوبت به همراه مقدار خطا بر حسب درصد

Table 6- A comparison of experimental data and numerical results of humidity mass fraction with error in percent

تیمار Treatment	تجربی Experimental	شبیه‌سازی Numerical	خطا (٪) Error (%)
شاهد Control	0.86	0.81	6.17
۳ ضربه 3-impacts	0.86	0.82	4.65
۸ ضربه 8-impacts	0.85	0.82	3.66
۱۳ ضربه 13-impacts	0.83	0.76	8.4

تلفات

در شکل ۱۶ تلفات شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی ارائه شده است. به منظور ارائه گزارش در مقیاس درصد، با وجود ۵۰ گرمی بودن هر دسته، مقادیر در عدد ۲ ضرب شدند تا گزارش به‌صورت تلفات در ۱۰۰ گرم از آن دسته گزارش شود. در کل، دسته شاهد دارای کمترین مقدار تلفات با ۱/۲۵۶ گرم به ازای ۱۰۰ گرم و دسته ۱۳ ضربه دارای بیشترین تلفات با مقدار ۷/۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم از محصول است. نکته حائز اهمیت افزایش تلفات ساقه‌کوبی بعد از ساقه‌کوبی با شدت ۸ ضربه است، به‌طوری که بعد از این شدت تلفات با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.



شکل ١٦– تلفات شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی

Fig. 16. Losses of various intensities of conditioning

لازم به ذکر است که با توجه به ارزیابی‌های انجام گرفته از نظر زمان خشک شدن تا رسیدن به رطوبت بهینه و همچنین مقدار تلفات بر حسب گرم محصول خشک شده، از بین ۴ تیمار مختلف، با در نظر گرفتن کیفیت محصول نهایی و تلفات آن‌ها، تیمار با ۸ ضربه به‌عنوان بهترین حالت انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

در محصولات علوفه‌ای مانند یونجه، رسیدن محصول به رطوبت مطلوب در زمان بسته‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، گروه شاهد و ۳ گروه ساقه‌کوبی شده از گیاه یونجه از نظر نرخ از دست دادن رطوبت، نیروی مورد نیاز برای جدایش برگ از ساقه در سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و در رطوبت‌های مختلف و همچنین شبیه‌سازی نرخ از دست‌دادن رطوبت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفتند. موارد بیان شده استخراج گردید و مورد بحث قرار گرفت.

با در نظر گرفتن کیفیت محصول نهایی و تلفات آن‌ها و ارزیابی‌های انجام گرفته بین ۴ تیمار مختلف (شاهد، ۳ ضربه، ۸ ضربه و ۱۳ ضربه)، تیمار ۸ ضربه، ساقه‌کوبی متوسط به‌عنوان بهترین حالت انتخاب شد. همچنین در هر دو آزمایش فاکتوریل اثرات شدت ساقه‌کوبی و زمان به‌ترتیب بر روی نسبت رطوبت و همچنین بیشینه نیروی جدا کردن برگ از یونجه به‌صورت معنی‌دار در سطح آماری

یک درصد به‌دست آمد.

به‌صورت جمع‌بندی، دسته شاهد دارای کمترین میزان تلفات با ۱/۲۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم و دسته ۱۳ ضربه دارای بیشترین تلفات با مقدار ۷/۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم از محصول است. تلفات ساقه‌کوبی بعد از ساقه‌کوبی با شدت ۸ ضربه افزایش یافته است، به‌طوری که بعد از این شدت تلفات با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد، از این رو شدت ساقه‌کوبی با تعداد بالاتر از ۸ ضربه سبب افزایش در میزان تلفات خواهد شد.

بنابر نتایج، مدل محیط متخلخل و بخش انتقال جرم مربوط به گونه‌ها در نرم‌افزار انسیس فلوئنت از قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های مربوط به خشک‌کردن محصولات کشاورزی برخوردار است. همچنین در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه گرادیان انتقال رطوبت مشاهده شده از شبیه‌سازی‌های تجربی به خوبی تأثیر اعمال ضربه‌ها بر فرآیندهای انتقال داخل گیاه را نشان داد.

References

1. Aboltins, A., and P. Kic. 2018. Influence of air velocity on drying dynamics of alfalfa. 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 1: 1470-1475.
2. Anderson, J. D. 2009. Basic Philosophy of CFD in Computational Fluid Dynamics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
3. Bartzanas, T., D. D. Bochtis, C. G. Sorensen, A. A. Sapounas, and O. Green. 2010. A numerical modeling approach for biomass field drying. Biosystems Engineering 106: 458-469. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010
4. Che, G., H. J. Wen, L. Wan, Y. R. Qing, and X. Wang. 2015. Kinematic Simulation and Experimental Study on Rotating Air Flow for Drying Alfalfa. Drying Technology 33: 1720-1727. https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1026980
5. Datta, A. K. 2007a. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. Journal of Food Engineering 80: 80-95. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013
6. Datta, A. K. 2007b. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. Journal of Food Engineering 80: 96-110. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.012
7. Engels, F. M., and H. G. Jung. 1998. Alfalfa stem tissues: Cell-wall development and lignification. Annals of Botany 82: 561-568. https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0705
8. Erriguible, A., P. Bernada, F. Couture, and M. Roques. 2006. Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by CFD. Chemical Engineering Research and Design 84: 113-23. https://doi.org/10.1205/cherd.05047
9. Farhang, A., A. Hosinpour, H. Darvishi, M. H. Khoshtaghaza, and T. Tavakolli Hashtjin. 2010. Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer. Global Veterinaria 5: 158-163.
10. Fasina, O., and S. Sokhansanj. 1995. Modelling the bulk cooling of alfalfa pellets. Drying Technology 13: 1881-1904. https://doi.org/10.1080/07373939508917055
11. Giuberti, G., G. Rocchetti, S. Sigolo, P. Fortunati, L. Lucini, and A. Gallo. 2018. Exploitation of alfalfa seed (*Medicago sativa* L.) flour into gluten-free rice cookies: Nutritional, antioxidant and quality characteristics. Food Chemistry 239: 679-687. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.004
12. Hassanpour, A., A. Modarres Motlagh, M. Esmaiili, and A. Rahmani Didar. 2011. Changes in the mechanical properties of white seedless grapes during different maturity stages. Journal of Food Research 21 (3): 343-355. (In Persian).
13. Hopkins, D. L., E. S. Toohey, M. J. Kerr, and R. Van de Ven. 2011. Comparison of two instruments (G2 Tenderometer and a Lloyd Texture analyser for measuring the shear force of cooked meat. Animal Production Science 511: 71-76. https://doi.org/10.1071/AN10136
14. Ivanov, Y. A., V. Pakhomov, S. Braginets, O. N. Bakhchevnikov, and A. Rukhlyada. 2018. Experimental study on microwave-vacuum drying of alfalfa. Journal of Engineering and Applied Sciences 13 (19): 8019-8024.
15. Jamaleddine, T., and M. Ray. 2010. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. Drying Technology 28: 120-54. https://doi.org/10.1080/07373930903517458
16. Kung, L., L. D. Satter, B. A. Jones, K. W. Genin, A. L. Sudoma, G. L. Enders, and H. S. Kim. 1987. Microbial Inoculation of Low Moisture Alfalfa Silage. Journal of Dairy Science 70: 2069-2077. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(87)80255-2
17. Naimi, S., G. Shahgholi, A. Rezvanivand Fanaie, and V. Rostampour. 2019. Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics. Journal of Agricultural Machinery 11 (2): 231-246. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v11i2.79613
18. Nazari G. M., A. Jafari, S. S. Mohtasebi, A. Tabatabaeefar, A. Sharifi, M. J. O'Dogherty, S. Rafiee, and G. Richard. 2008. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems.

Biosystems Engineering 101: 199-208. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.07.006
19. Nazari G. M., A. Tabatabaeefar, A. Jafari, A. Sharifi, S. Rafiee, and S. S. Mohtasebi. 2009. Influence of moisture content, rate of loading and height regions on tensile strength of alfalfa stems. International Agrophysics 23: 27-30.
20. Patil, R. T., S. Sokhansanj, E. A. Arinze, and G. J. Schoenau. 1993. Methods of expediting drying rates of chopped alfalfa. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 36: 1799-1803.
21. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. International Journal of Food Engineering 11: 71-77. https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0125
22. Rezvanivandefanayi, A., A. Hasanpour, and A. M. Nikbakht. 2019. Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics. Journal of Agricultural Machinery 10 (2). (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v10i2.76872
23. Rotz, C. A., and Y. Chen. 1985. Alfalfa drying model for the field environment. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 28 (5): 1686-1691. DOI: 10.13031/2013.32500
24. Sabralilou, B., A. Mohebbi, E. Akbarian, and A. Rezvanicand fanaei. 2019. Aero-acoustical study of axial fan using computational fluid dynamics. Journal of Agricultural Machinery 10 (2): 255-264. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v10i2.74963
25. Shahbazi, F., and M. Nazari. 2012. Bending and shearing properties of safflower stalk. Journal of Agricultural Science and Technology 14: 743-754.
26. Siles, J. A., P. González-Tello, M. A. Martín, and A. Martín. 2015. Kinetics of alfalfa drying: Simultaneous modelling of moisture content and temperature. Biosystems Engineering 129: 185-196. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007
27. Tavakoli, H., S. S. Mohtasebi, and A. Jafari. 2009. Effects of moisture content, internode position and loading rate on the bending characteristics of barley straw. Research in Agricultural Engineering. 55: 45-51. https://doi.org/10.17221/26/2008-RAE
28. Wiersma, D. W., P. R. Carter, K. A. Albrecht, and J. G. Coors. 1993. Kernel milkline stage and corn forage yield, quality, and dry matter content. Journal of Production Agriculture 9: 92-99. https://doi.org/10.2134/jpa1993.0094
29. Wu, H. 2004. Alfalfa drying properties and technologies– in Review Nature Science 2: 65-67.
30. Zhao, A., X. XiaoFang, W. YongKang, R. HaiYan, G. G. DengKe, J. JinHua, and S. C. Li. 2018. Measuring texture quality of fresh jujube fruit using texture analyser. Journal of Fruit Science 35: 631-641.
31. Zobeiri, M., V. Rostampour, A. Rezvanivande Fanaei, and A. M. Nikbakht. 2019. Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. Iran Biosystems Engineering 52. (In Persian). DOI: 10.22059/ijbse.2020.276317.665166